Journal of Radiation Industry 12(3) : 183~192(2018)

환경방사능 측정을 통한 전남·북 산림지역의 안정성 분석

박상원[1,2] · 신지우[3] · 송현제[4] · 여화연[5] · 곽종길[6,7] · 동경래[8,*]

[1]과학기술연합대학원대학교 방사선종양의과학,
[2]한국원자력의학원 RI응용연구부, [3]허리편한병원 영상의학과,
[4]광주보건대학교 임상병리과, [5]남부대학교 방사선학과,
[6]동신대학교 보건의료학과, [7]KS 병원 종합건진센터, [8]광주보건대학교 방사선과

Analysis of the Stability of the Forest Area in Jeollanamdo and Jeollabukdo through Environmental Radioactivity Measurement

Sang-Won Park[1,2], Ji-Woo Shin[3], Hyeon-Je Song[4],
Hwa-Yeon Yeo[5], Jong-Gil Kwak[6,7] and Kyung-Rae Dong[8,*]

[1]*Radiological and Medico-Oncological Sciences, University of Science and Technology, 217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea*
[2]*Division of RI-convergence Research, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, 75, Nowon-ro, Nowon-gu, Seoul 01812, Republic of Korea*
[3]*Good Spine Hospital, 9, Jingeonjung-gil, Gongdo-eup, Anseong-si, Gyeonggi-do 17564, Republic of Korea*
[4]*Department of Clinical Pathology, Gwangju Health University, 683-3 Shinchang-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 62287, Republic of Korea*
[5]*Department of Radiology, Nambu University, 864-1 Wolgye-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Republic of Korea*
[6]*Department of Public Health and Medicine, Dongshin University Graduate School, 185, Geonjae-ro, Naju-si, Jeollanam-do 58245, Republic of Korea*
[7]*Comprehensive Medical Examination Center, KS Hospital, 220, Wangbeodeul-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62248, Republic of Korea*
[8]*Department of Radiological Technology, Gwangju Health University, 73, Bungmun-daero 419 beon-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62287, Republic of Korea*

Abstract - This study is intended to provide radiation stability information to the local residents through measurements and analyses of the environmental radiation levels in the natural environments of Jeollanamdo and Jeollabukdo. Three environmental samples, including water, tree leaves, and soil, were collected in seven popular recreational forests, selected from forests in Jeollanamdo and Jeollabukdo including national parks. The control group was determined after referring to the emission concentration of activity in other regions and the environmental radioactivity concentra-

* Corresponding author: Kyung-Rae Dong, Tel. +82-62-958-7668,
Fax. +82-62-958-7669, E-mail. krdong@hanmail.net

tion data released by KINS in 2012 and in conformity with Nuclear Safety Law and Recommendations of UNSCEAR and ICRP. The collected samples underwent air drying preprocess before removing organic matters (tree branches, fallen leaves, and gravels) out of them, and the pretreated samples were dried using a vacuum oven, followed by the gamma detection using High Purity Germanium Detector (HPGe) and Multi-Channel Pulse Height Analyzer (MCA) after conducting measurement per sample for a period of 80,000 seconds. As results, the level of environmental radiation was ^{40}K 0.36 Bq·kg^{-1} that did not exceed the reported environmental radiation levels detected at tree leaves by KINS in 2012, ^{137}Cs 71.5 Bq·g^{-1} and ^{40}K 66.792 Bq·kg^{-1}, while ^{137}Cs was not detected. In case of surface soil sample, ^{137}Cs 13.3 ± 0.4 Bq·kg^{-1} and ^{40}K 810 Bq·kg^{-1} were confirmed in the study in comparison with the reported average radiation emission on the surface soil by KINS in the same year, ^{137}Cs 10.815 Bq·kg^{-1} and ^{40}K 835.66 ± 184.9 Bq·kg^{-1}, which ^{137}Cs exceeded the KINS data while ^{40}K was lower than the data. For the collected deep soil, ^{137}Cs 14.7 Bq·kg^{-1}, ^{40}K 946 Bq·kg^{-1} were resulted, comparing them to ^{137}Cs 21.5 Bq·kg^{-1} and ^{40}K 670 ± 16 Bq·kg^{-1}, showing higher concentration of ^{137}Cs and lower concentration of ^{40}K than those in KINS data. When analyzing the entire soil samples including surface and deep soils, ^{137}Cs was confirmed to have less radiation level as the depth of soil increased, implying ^{40}K was not affected by the depth of soil. When the radiation emission concentration was measured in-situ in the recreational forests, surface soil samples showed higher levels than the reported emission levels of environmental radioactivity by KINS in 2012 for ^{137}Cs while the deep soil exhibited lower level than the reported one. The radiation level was lower than the minimum acceptable level recommended by ICRP, UNSCEAR, and Nuclear Power Act. When the radiation level data from other regions were adopted as the control group, ^{137}Cs showed relatively higher level in the study area. The results of this study are expected to be used as the basic public health data for visitors to the forests in Jeollanamdo and Jeollabukdo as well as for local residents in the future.

Key words : Environmental radiation, Jeollanamdo, Jeollabukdo, HPGe

서 론

인간을 포함한 모든 생물이 접하고 있는 환경 내에는 인위적으로, 자연적으로 만들어지는 방사선이 존재하게 되는데, 이를 환경방사선이라 한다. 이러한 환경방사선은 핵종이 만들어지는 방법과 피폭의 정도, 인체에 가해지는 피해의 정도에 따라 자연방사선과 인공방사선으로 나눌 수 있다. 자연방사선이란 인간의 의지로 만들어 지는 방사선이 아닌 우주로부터의 1 · 2차 우주선, 토양 · 대기 · 지하수 등과 같은 자연 속에 내재되어 있다가 방출되는 방사선, 인체의 체내에 존재하는 자연방사선 핵종으로 만들어지는 방사선 등을 말하며, 등의 핵종을 가지고 있고, 피폭량의 소량과 인체에 가해지는 피해정도가 작아서 장해의 정도가 쉽게 나타나지 않는 것이 그 특징이다. 자연방사선 준위는 우주선(광자, 뮤온 등)과 지각 방사선(^{40}K, ^{232}Th, ^{266}Ra 등)에 의해 결정되고 대게 0.08~0.1 μGy·hr^{-1}의 범위에 있지만 방사선을 내는 물질인 우라늄과 같은 광물질의 매장량이 많고 적음, 고도의 차이 등에 따라 지역별로 상당한 차이를 보이며 브라질, 중국, 인도, 미국, 일본 지역에서는 우리나라 보다 높은 방사선 세기를 나타내기도 한다(Euclid 1997). 반면, 과학의 발전과 함께, 인간의 인위적인 행동으로 나타나게 된 인공방사선은 주로 핵실험 및 원자력 발전소의 사고로 인한 핵종의 유출로 인하여 그 핵종이 자연환경에 흡수되거나 인체에 피폭되는 위험성은 있어 장해발생 시 그 위험정도가 크지만, 산업, 군사, 연구 및 TV나 전자렌지와 같은 전자제품, 공항에서의 보안 검색 장치, 병원이나 진료소에서 사용하는 X-ray, CT와 같은 건강검진 장비나 암 치료 장치 등 여러 분야에서 사용되면서 인간의 삶에 미치는 영향은 커지고 있다(Muramatsu *et al*. 2002). 21세기 과학 기술의 발달과 더불어 원자력 발전소 및 각종 연구기관, 의료기관, 산업 분야에서 방사성 물질의 사용이 증가되고 규모가 대형화됨에 따라 일상생활에서 방사선에 노출될 가능성이 증가하고 있어 방사능 오염에 대한 우려의 소리도 높아지고 있는 실정이기에 더욱 더 조심하고 신중해야 할 필요가 있다(Panatto *et al*. 2006). 폭발이나 원자력 발전소에서 생성되는 인공방사성 핵종들은 ^{3}H, ^{14}C 등 몇 가지 핵종을 제외한 나머지는 대부분 핵분열 생성물이며, 이 중 ^{137}Cs과 ^{90}Sr은 환경에서 손쉽게 발견되는 핵종으로서 반감기가 길어 식물체나 토양, 물, 나뭇잎과 같은 자연환경으로 흡수를 통하여 육상 생태계에 영향을 주고 있다. 현대과학기술의 발전과 방사선물질을 사용하는 연구실, 발전소, 의료기관의 증가로 인하여 방사선의 노출가능성 증대되어지고 있는 상황에, 1986년 러시아 체르노빌에서의 원자력발전소 폭파사고, 2011년 일본 후쿠시마 원전 폭파사고로 인한 피해발생으로 방사능에 대한 경각심은 날로 늘어

Table 1. Collection points of soil, tree leaves, and water samples in Jeollanamdo and Jeollabukdo

No	Measurement point	Time	Temperature/Humidity	Latitude/Longitude
1	D Mountain	13:00	30°C/85%	north latitude 35°51′38″/longitude 127°44′47″
2	N Mountain	11:00	31°C/84%	north latitude 35°28′47″/longitude 126°53′17″
3	M Mountain	15:00	30°C/88%	north latitude 35°45′44″/longitude 127°24′17″
4	J Mountain	13:45	31°C/85%	north latitude 35°56′52″/longitude 127°41′28″
5	U Mountain	11:00	26°C/84%	north latitude 34°46′27″/longitude 126°21′08″
6	W Mountain	12:00	27°C/82%	north latitude 34°46′04″/longitude 126°42′16″
7	C Mountain	13:30	27°C/82%	north latitude 34°45′10″/longitude 127°19′59″

가고 있는 추세이나, 전국적으로 국가환경방사선 지방측정소는 12개, 간이방사선측정소는 36개, 군부대와 연관된 측정소가 19개, 원자력 발전소 주변 측정소가 4군데라는 점에서 인구 밀도가 높고 유동인구가 많은 도심이나 국립공원과 같은 자연휴양지, 해발고도가 높은 산악지대는 측정하기가 어렵고 자료도 부족한 상황이다. 한편, 1906년 발표된 Bergonie와 Tribondeau 법칙에 의하면 X선은 생식능력이 매우 활성화된 세포, 장기간 분열하는 세포, 그리고 형태와 기능이 적어도 고정되지 않은 세포에 훨씬 더 효과적이라고 한다. 즉 방사선의 효과는 세포의 생식 능력과 활성에 비례하고 세포 분화의 전도에 역비례 한다는 의미이다. 유엔 방사선 영향 과학 위원회에 의하면 일반인이 자연방사선으로부터 1년간 받는 총 피폭선량은 2.4 mSv으로, 우주선으로부터 약 0.38 mSv, 지각방사선을 구성하는 자연 방사성 핵종으로부터 외부피폭선량 약 0.41 mSv와 내부피폭선량 약 1.60 mSv라고 보고한 적이 있다(UNSCEAR 2000).

본 연구에서는 현대인들이 자주 이용하는 전남 · 북 지역의 국립공원 및 산림지역의 방사능 방출농도가 기준치를 초과하는지 조사하였다. 각각의 국립공원 내의 토양, 계곡물, 각 지점마다 가장 많이 서식하는 나무의 나뭇잎을 채취하여 시료에 함유되어 있는 환경방사선 방사능 농도를 측정하였다. 따라서 실험을 통하여 평상시 환경 방사선 및 방사능의 분포에 대한 전국적인 기초자료를 확보하고 지역 간 특성과 분포의 비교도를 작성해 봄으로써 향후 방사능 분석 기술향상에 기여하여 국민 건강 및 환경을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

실 험

1. 시료채취방법

환경방사선 정도를 정확하게 판단하기 위해서 시료 채취는 측정과 분석 못지 않게 중요하다. 시료는 대상지역의 오염정도의 척도가 될 수 있어야 하고 또한 지역과 계절 특성과 무관해야 하며 시료 채취 및 분석에 용이해야 한다. 따라서 선정기준은 전남 · 전북 지역의 국립공원 및 산림지역 중 지역민들이 가장 많이 이용하는 7개의 산을 선정하였으며, 채취시간대는 일조량이 가장 많은 낮 시간(오전 11시~오후 5시)에 채취하였다. 채취 장소는 등산객이 자주 이용하는 산책로부근이자 산 중턱부근을 선정하였다(Table 1).

토양은 공극도나 습도, 날씨, 토양에 포함되어 있는 물질들의 상태, 토양의 질 등을 포함한 지각변동이나 자연적 침식과 같은 요인들에 의해서 영향을 많이 받아 평균적인 방사능 방출농도어려움이 있을 수 있다. 그래서 가능한 유토에 의한 침식과 붕괴가 적고 건조물 및 인위적인 교란이 없는 평평한 지점에서 채취하였다. 습도가 가장 적게 나타날 일광이 많은 지점 및 시간대(오전 10시~오후 2시)로 지정하고, 사람들이 가장 잘 지나다니는 산책로 및 등산코스에서 표토(0~4 cm 깊이)와 심토(4~9 cm 깊이)로 분류하여 각각 소형 야전삽을 이용하여 채취하였다. 채취장소의 대표성을 위해서 각 산림지역에서도 4부분의 지점을 선정하여 혼합하여 그 산림의 토양시료로 간주하고, 채취된 토양은 유기물(나뭇가지, 낙엽 등)을 제거한 다음 10 cm×20 cm의 밀봉팩에 담았다. 나뭇잎은 흡수되어 있는 방사능 방출 농도를 알아보기 위해 지점의 대표성을 나타내면서 가장 많이 분포하는 나무의 종류를 조사하여 각 채취장소 마다 4부분의 채취지점으로 채취하였다. 직접 손으로 나뭇잎을 채취한 후, 큰 가지를 제외한 잔가지와 나뭇잎만 포함한 상태를 만들어, 500~700 g 정도의 나뭇잎을 10 cm×20 cm 밀봉팩에 담았다. 물은 방문자의 이용 및 거주민들의 식수로 이용되는 계곡을 선정하여, 흐르는 계곡물 상태에서 10 cm×20 cm의 밀봉팩에 담아 내재되어 있던 유기물(나뭇잎, 가지, 자갈)을 제거한 후 채취시료로 하였다(Fig. 1).

2. 시료 전처리

전처리의 목적은 원시료가 갖고 있는 방사성핵종의 손실없이, 균질하게 농축하여 원시료의 부피를 줄이는 것이다. 그 때문에 액체시료에서는 증발농축, 고체시료와 생체시료에서는 건조, 분쇄 등의 방법을 사용하여 시료를 조제한다(Battist *et al*. 2000). 각각의 채취한 시료를 안전하게 운반하기 위해 밀봉된 비닐팩을 이용하여 실험실로 운반한 후, 토양시료는 tray 위에 부어 편평하게 한 뒤, 채취량을 측정하

Fig. 1. Collected materials.

Table 2. Sampling quantity of soil

Sample name	Measurement point	Sample quantity	Sample filled
Soil	U Mountain (Surface soil)	3326.4 g	465.7 g
	U Mountain (Deep soil)	2884.4 g	657.7 g
	D Mountain (Surface soil)	3171.8 g	505.2 g
	D Mountain (Deep soil)	3007.8 g	540.3 g
	N Mountain (Surface soil)	1683.4 g	457.3 g
	N Mountain (Deep soil)	1603.7 g	524.7 g
	W Mountain (Surface soil)	3473.1 g	461.6 g
	W Mountain (Deep soil)	2513.1 g	574.6 g
	J Mountain (Surface soil)	3619.4 g	679.2 g
	J Mountain (Deep soil)	3066.2 g	569.1 g
	M Mountain (Surface soil)	4102.1 g	598.8 g
	M Mountain (Deep soil)	1635.3 g	301.2 g
	C Mountain (Surface soil)	1335.8 g	376.4 g

였다. 이 후, 그늘진 곳에서 신문지위에 최대한 편평하게 펼쳐 놓은 상태에서 3일 정도 풍건하였다. 건조된 토양시료를 막자사발을 이용하여 충분히 분쇄하여 입자의 크기를 고르게 하였고, 2 mm 체(sieve)로 체질하여 토양에 포함되어 있는 잔여 불순물(유기물)을 제거하였다. 선별된 시료를 감마핵종 분석을 위해 마리넬리비커에 일정량을 정하여 충진시키고 무게를 측정하여 정보를 기록하였다(Table 2).

나뭇잎시료는 그늘진 곳에서 3일 정도 일정한 온도를 유지한 채 풍건을 하였다. 그 후 건조된 나뭇잎시료를 105°C 오븐에서 24시간 건조시킨 후, 믹서기를 사용하여 분진가루 형태로 충분히 분쇄한 후, 잔여 유기물을 제거하고 분쇄상태의 가루가 용기 내 일정하게 분포되게 하기 위해서 2 mm 체(Sieve)로 체질하여 분진가루 크기를 선별하였다. 선별된 시료를 감마 핵종 분석을 위해 마리넬리비커에 일정량을 정하여 충진시키고 무게를 측정하여 정보를 기록하였다. 위의 과정을 거친 시료들은 감마동위원소분석기를 이용하여 측정한다(Table 3).

Table 3. Sampling quantity of leaf

Sample name	Measurement point	Sample quantity	Sample dry quantity	Sample filled
Leaf	U Mountain	178.7 g	177.6 g	130.7 g
	D Mountain	163.2 g	143.5 g	143.3 g
	N Mountain	79.9 g	61 g	68.1 g
	W Mountain	157.2 g	120.9 g	104.7 g
	J Mountain	172.3 g	150.1 g	119.8 g
	M Mountain	224.3 g	196 g	159.9 g
	C Mountain①	167.7 g	164.6 g	104.1 g
	C Mountain②	138.2 g	125.2 g	85.3 g
	C Mountain③	352.2 g	338.6 g	127.7 g
	C Mountain④	255.8 g	237.2 g	130.7 g

Table 4. Characteristics of HPGe Detector

Model	High-Purity Germanium Detector (GC-3020)
Detector	Relative efficiency 20% FWHM: 1.80 KeV at 1.33 MeV 60-Co FWTM/FWHM: 1.90 keV Peak-to-Compton Ratio, 60-Co 51 : 1 FWHM 850 eV at 122 KeV
Operating Bias	+3500 V
Digital Spectrum Analyzer	CANBERRA DSA-1000
Nuclide Analysis Program	Aptec

3. 시료의 방사능측정 및 분석

위와 같이 전처리한 시료를 고순도게르마늄검출기(HPGe) 및 다중파고분석기(MCA)를 이용하여 정밀 감마핵종 분석을 수행하였다(Kim *et al*. 2012). 본 연구에 사용된 감마 핵종 분석 측정기기는 고순도 Ge 반도체 검출기(high Purity Germanium Detector, Canberra, USA)와 다중 파고 분석기(MCA, ORTEC, USA)로 구성된 것을 사용하였고 게르마늄 검출기의 특성은 Table 4와 같다.

HPGe 검출기는 Ge 결정과 주변 공기와의 열전도를 막기 위해 진공상태의 수직형 Crystal에 들어있으며, 유도된 누설 전류로 에너지 분해능이 손상되지 않도록 30 l dewar 내에 액체질소를 채워 77K로 냉각시켜 사용한다. 또한 자연방사선에 의한 background를 감소시키기 위하여 약 10 cm 두께의 납 차폐체(Canberra, 767)로 차폐되었다. 충진된 토양시료와 나뭇잎시료에 대한 방사성 핵종의 농도를 측정하기 위하여 시료 1개당 측정시간을 80,000초로 설정하여 감마 방사성 핵종의 농도 분포를 분석하였다(Kim *et al*. 2012). 계측하여 얻어진 스펙트럼을 이용하여 각 핵종의 방사능 농도를 결정하기 위하여 감마방사성 핵종의 분석용 프로그램인 APTEC 프로그램에 측정시간, 충진량 등을 입력하여 각 핵종별로 방사능농도를 산출하였다. APTEC 프로그램의 방사선 분석을 위한 흐름도와 감마 방사성핵종 분석에 사용된 측정 장치의 배열도는 다음과 같다(Figs. 2, 3).

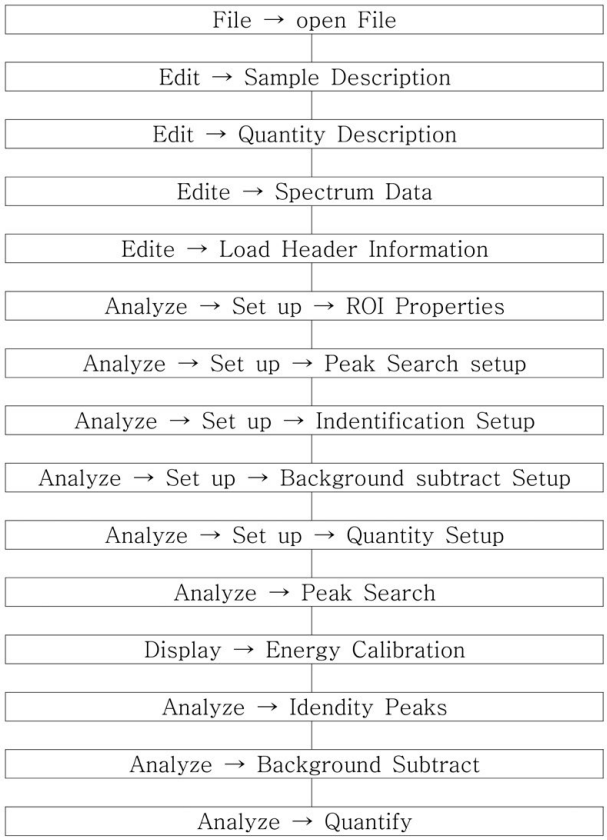

Fig. 2. APETC program analysis flow chart.

4. 시료의 방사능 농도 측정 및 최소검출농도(MDA) 설정

일반 환경 시료의 경우 매우 낮은 방사능을 갖기 때문에 보통 24시간 이상의 측정시간을 갖는다. HPGe검출기의 상대효율은 30%이며 에너지분해능(FWHM)은 ^{60}Co 핵종에서 방출되는 1.33 MeV의 감마선 에너지에 대하여 1.78 keV이다.

피크 대 컴프턴(peak-to-compton) 비는 각각 54/1로 하고 교정용 혼합표준선원을 이용하여 감마핵종분석기의 에너지 및 효율을 교정한다. Background 측정시간을 80,000초로 정하고 나서 스펙트럼은 분석용 프로그램인 GammaVision (EG&G ORTEC Co)을 이용하여 분석한다(Fig. 4).

장치 내에서 방사선 농도를 측정하기 위해 저준위 환경방사능 분석에서 의미 있는 MDA 값을 산출하기 위해서 신뢰도를 95%로 설정하여(Kα = Kβ = K = 1.645) 최소 검출 방사능 농도를 계산한다. 환경시료 중 최소검출 방사능 농도의 의미인 MDA는 LLD에서 사용된 Back ground 계수치와 계측시간 뿐만 아니라 계측효율, 화학수율 및 시료량에 의존한다. 따라서 MDA 값의 산출 공식은 다음과 같다(Eq. 1).

$$MDA_1 = \frac{4.65\sqrt{BGC}}{t_B \cdot E \cdot Y \cdot S} \quad (1)$$

여기서 BGC는 Background 계수치, ts는 시료 계측시간, tB는 Background 계측시간, μB는 Background 계수율, Y는

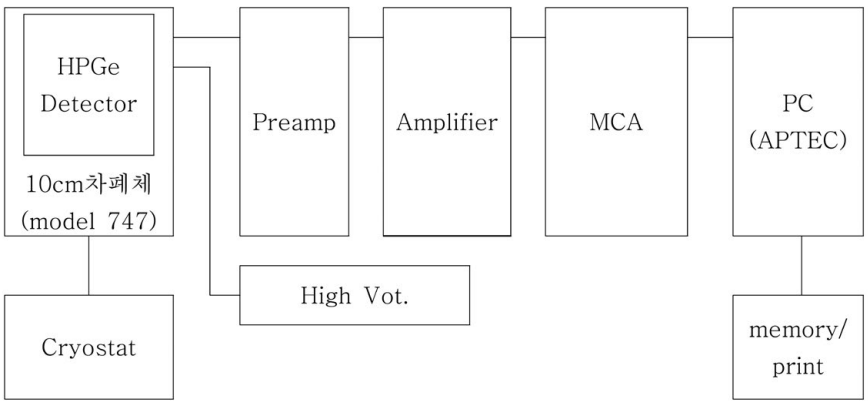

Fig. 3. Array of analytical device of the gamma radionuclides.

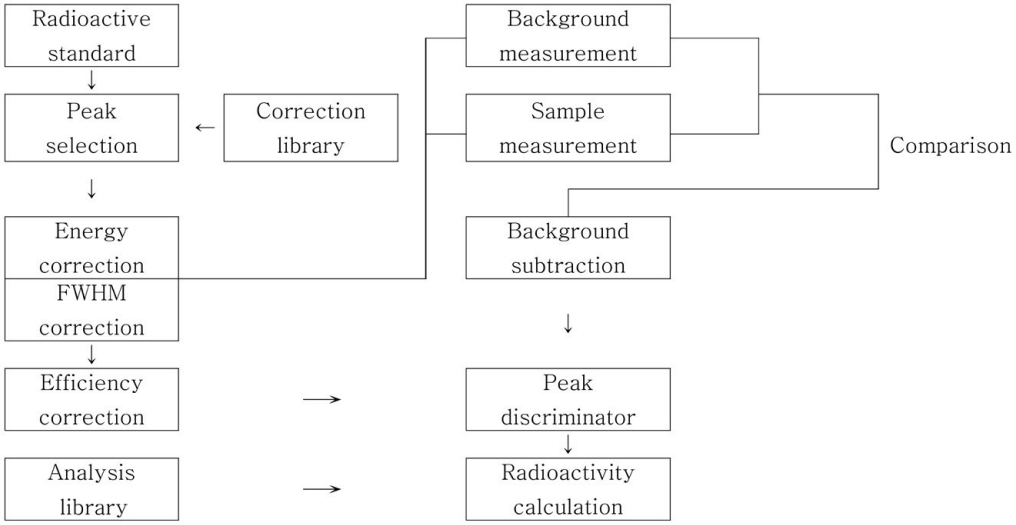

Fig. 4. Gamma nuclide analyzer process.

Table 5. ^{40}K radiation level of the soil sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (kVp)	MDA (Bq·kg^{-1})	Activity (Bq·kg^{-1})
D Mountain (Deep soil)	30°C/85%	1460.7	3.98E+000	8.297408E+002
U Mountain (Surface soil)	26°C/84%		4.02E+000	1.110541E+003
U Mountain (Deep soil)	26°C/84%		3.17E+000	7.902609E+002
C Mountain (Surface soil)	27°C/82%		4.28E+000	7.816259E+002

Table 6. ^{40}K radiation level of the tree leaf sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (keV)	MDA (Bq·g^{-1})	Activity (Bq·g^{-1})
N Mountain	31°C/84%	1460.81	3.73E−002	3.314410E−001
D Mountain	30°C/85%		1.80E−002	4.871629E−001
J Mountain	31°C/85%		1.89E−002	3.982463E−001
M Mountain	30°C/88%		1.55E−002	5.417884E−001
U Mountain	26°C/84%		1.80E−002	6.866342E−001
W Mountain	27°C/82%		2.11E−002	3.066038E−001
			2.37E−002	2.278576E−001
C Mountain	27°C/82%		2.66E−002	3.164110E−001
			1.92E−002	2.169834E−001
			1.74E−002	8.457634E−002

화학수율, S는 보정인자로 시료량과 측정중 반감기를 보정하는 인자이다(Ghiassi-nejad *et al*. 2002).

결 과

1. 산림별 ^{40}K 방사능 농도

^{40}K 방사능 농도는 각 산림의 분포에 따라 D Mountain에서는 토양(심토) 8.297408E+002 Bq·kg^{-1}, 나뭇잎 4.871629E−001 Bq·g^{-1}, U Mountain은 토양(표토) 1.110541E+003 Bq·kg^{-1}, 토양(심토) 7.902609E+002 Bq·kg^{-1}, 나뭇잎 6.866342E−001 Bq·g^{-1}, C Mountain에서는 토양(표토) 7.816259E+002 Bq·kg^{-1}, 나뭇잎 2.11E−001 Bq·g^{-1}, N Mountain에서는 나뭇잎 3.314410E−001 Bq·g^{-1}, J Mountain은 나뭇잎 3.982463E−001 Bq·g^{-1}, M Mountain은 나뭇잎 5.417884E−001 Bq·g^{-1}, W Mountain에서는 나뭇잎 3.066038E−001 Bq·g^{-1}이 검출되었다. 물 시료에서는 ^{40}K이 측정되지 않았다(Tables 5∼7).

2. 산림별 ^{137}Cs 방사능 농도

^{137}Cs 방사능 농도는 각 산림 분포에 따라 U Mountain에서는 표토 2.697372E+000 Bq·kg^{-1}, 심토 7.160727E−001

Table 7. ^{40}K radiation level of the water sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (keV)	MDA ($Bq \cdot g^{-1}$)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$)
N Mountain	31°C/84%	1460.81	1.96E−003	−
D Mountain	30°C/85%		1.81E−003	−
J Mountain	31°C/85%		1.90E−003	−
M Mountain	30°C/88%		1.97E−003	−
W Mountain	27°C/82%		1.97E−003	−
C Mountain	27°C/82%		4.03E−003	−

Table 8. ^{137}Cs radiation level for the soil sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (kVp)	MDA ($Bq \cdot kg^{-1}$)	Activity ($Bq \cdot kg^{-1}$)
D Mountain (Deep soil)	30°C/85%	661.66	3.87E−001	−
U Mountain (Surface soil)	26°C/84%		2.46E−001	2.697372E+000
U Mountain (Deep soil)	26°C/84%		1.73E−001	7.160727E−001
C Mountain (Surface soil)	27°C/82%		2.68E−001	2.661959E+001

Table 9. ^{137}Cs radiation level for the tree leaf sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (keV)	MDA ($Bq \cdot g^{-1}$)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$)
N Mountain	31°C/84%	661.65	1.84E−003	−
D Mountain	30°C/85%		9.71E−004	−
J Mountain	31°C/85%		1.12E−003	−
M Mountain	30°C/88%		8.88E−004	−
U Mountain	26°C/84%		9.90E−004	−
W Mountain	27°C/82%		1.22E−003	−
			9.50E−004	−
C Mountain	27°C/82%		1.55E−003	−
			1.05E−003	−
			1.04E−003	−

Table 10. ^{137}Cs radiation level for the water sample

Measurement point	Temperature/Humidity	Energy (keV)	MDA ($Bq \cdot g^{-1}$)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$)
N Mountain	31°C/84%	661.65	1.04E−004	−
D Mountain	30°C/85%		1.04E−004	−
J Mountain	31°C/85%		1.02E−004	−
M Mountain	30°C/88%		1.01E−004	−
W Mountain	27°C/82%		9.97E−005	−
C Mountain	27°C/82%		2.26E−004	−

$Bq \cdot kg^{-1}$, C Mountain에서는 표토 2.661959E+001 $Bq \cdot kg^{-1}$, 나뭇잎 3.588154E−003 $Bq \cdot g^{-1}$이 검출되었고, 물을 포함한 나머지 나뭇잎과 토양시료에서는 검출되지 않았다(Tables 8∼10).

3. 위도별 ^{40}K 방사능 농도 측정 결과

위도 및 지역별 ^{40}K 방사능 농도 값은 토양의 경우 전남지역(위도 34°)에서는 790±1 $Bq \cdot kg^{-1}$, 전북지역(위도 35°)에서는 829±1 $Bq \cdot kg^{-1}$이 나타남을 알 수 있으며, 나뭇잎의 경우 전남지역(위도 34°) 0.31±0.20 $Bq \cdot kg^{-1}$, 전북지역(위도 35°) 0.44±0.09 $Bq \cdot kg^{-1}$으로 모두 최소검출하한치(MDA) 이상으로 검출되었다. 또한, 위도가 더 높은 전북지역의 값이 전남지역의 값보다 더 높이 나타남을 알 수 있다(Tables 11, 12).

고 찰

본 연구에서는 물, 토양, 나뭇잎 3가지 시료를 분석하여 ^{40}K과 ^{137}Cs의 농도값을 측정하려 했으나, 물 시료값의 측정결과 나오지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 토양과 나뭇잎 2가지의 시료의 분석을 통하여 농도 측정 값을 비교하려 한다. ^{40}K는 천연방사성핵종으로 토양뿐 아니라

Table 11. Comparison of ^{40}K radiation level for the soil sample

Source	Measurement point	Latitude	Radioactivity concentration ($Bq \cdot kg^{-1}$)	MDA
^{40}K	South Jeolla Province	34°	790 ± 1	3.17
	North Jeolla Province	35°	829 ± 1	3.98

Table 12. Comparison of ^{40}K radiation level for the tree leaf sample

Source	Measurement point	Latitude	Radioactivity concentration ($Bq \cdot kg^{-1}$)	MDA
^{40}K	South Jeolla Province	34°	0.31 ± 0.20	0.02 ± 0.00
	North Jeolla Province	35°	0.44 ± 0.09	0.02 ± 0.01

농 · 축 · 수산물과 해양시료에도 존재하는 감마동위원소로서 환경방사능에 의한 주민 위해도 평가 및 환경영향평가에 중요한 핵종이며 원자력시설 운영이나 토양의 깊이에 따라 특별이 달라지는 것은 아니며 지각의 구성요소에 따른 결과로 사료된다(Lee *et al*. 1995). 13개의 지방측정소의 모니터링 포스트와 비상시 토양시료 채취지점에서 채취한 토양 시료의 분석결과는 ^{40}K값이 835.66 ± 184.9 $Bq \cdot kg^{-1}$으로 연구의 측정값 평균 8.78E + 02 $Bq \cdot kg^{-1}$보다 낮게 나타났고, 나뭇잎시료는 ^{40}K 66.792 $Bq \cdot kg^{-1}$으로 본 연구의 결과 0.36 $Bq \cdot kg^{-1}$보다 높은 값을 나타내었다. 토양의 경우 KINS의 측정 값 평균보다 높게 나왔음을, 나뭇잎 시료의 경우 KINS의 측정 평균 값보다 낮게 나왔음을 알 수 있다. ^{137}Cs의 전국 13개 지방측정소 모니터링 포스트 주변의 값은 표토 10.815 $Bq \cdot kg^{-1}$, 심토 21.5 $Bq \cdot kg^{-1}$으로, 연구의 측정값 표토 14.7 $Bq \cdot kg^{-1}$은 KINS자료보다 높게, 심토 0.716 $Bq \cdot kg^{-1}$는 KINS 자료보다 비교적 낮은 값을 나타내었다. 나뭇잎의 13개 지방측정소 모니터링 포스트 주변의 값은 71.5 $Bq \cdot g^{-1}$이나, 본 연구에서 ^{137}Cs은 측정되지 않았다. 측정값이 차이는 측정 지점의 차이로 13개 지방 측정소의 측정값은 토양의 복개가 잘 일어나지 않는 곳의 수치인 반면 본 연구의 측정값은 사람의 왕래가 빈번하고 지표가 노출된 산책로 및 등산코스의 토양을 시료로 하여 비교적 표토에 집중된 것으로 보고 있는 ^{137}Cs의 농도 값에 차이가 있다고 사료된다. 또한, 원자력 안전법 제6조 '환경방사능 분석을 위한 검출하한치'에 나와 있는 Cs의 검출하한치(MDA)를 본 연구결과와 비교하면, 본 연구에서 얻은 토양의 검출하한치의 평균값은 0.27 ± 0.09 $Bq \cdot kg^{-1}$, 나뭇잎의 검출하한치 평균값의 경우 농축산물과 비교하여 0.000016 $Bq \cdot kg^{-1}$으로 두 가지 시료 모두 법령에서 제시한 값보다 낮음을 알 수 있다. 본 연구를 측정결과 값을 산출하기 위하여 고순도 게르마늄 방사선검출기(이하 HPGe) 장치를 사용하였고, 이를 통해 최소검출하한치(MDA) 수치를 내어 안정성 검토를 하였다. HPGe는 여러 가지 종류가 있다. 보통 HPGe 검출기는 크게 역 바이어스된 다이오드로 볼 수 있는데, 게르마늄은 n형과 p형으로 분류되며 이는 결정 내에 acceptor 혹은 donor의 농도에 의해 결정된다. 결정 내의 전기장은 매우 중요하기 때문에 유용한 모양은 디스크 형태나 깊은 중심부를 가지는 원통형으로 제한되며 원통형은 한쪽 끝이 닫혀 있어 동축형이라고 불리며 디스크형은 평면형으로 불린다. 특히 동축형은 검출기의 크기가 커지면서 그에 따른 정전 용량이 커지게 된다. 높은 정전 용량은 분해능의 저하로 나타난다(Ju *et al*. 2012).

본 연구에서 사용된 HPGe검출기는 동축형의 검출기를 사용하였으며 KINS의 검출기와는 달리 분해능과 검출 효율이 저하된 것으로 판단된다. 최저 검출 하한치(MDA)는 검출기의 검출 효율에 따라서 그 수치의 변화도 발생되며, 분해능 및 백그라운드, 그리고 효율에 따라서 영향을 받는다.

MDA에 관련된 식은 다음과 같은데, R(E)는 에너지의 함수로써 검출기의 분해능을 말하며, B(E)는 에너지에 따른 백그라운드를, ε(E)는 에너지에 대한 절대 효율 값이다. 채취된 시료의 양에 의해서도 값의 변화가 있다(Eq. 2).

$$MDA(E) = \frac{\sqrt{R(E)B(E)}}{\varepsilon(E)} \quad (2)$$

보통 방사능 준위가 낮은 시료의 경우에는 방사는 측정시 많은 양의 시료가 요구되며 시료량의 증가로 인하여 방출된 감마선이 시료 자체에서 산란되거나 흡수된 확률이 증가하게 되므로 검출기에 도달할 확률은 감소된다. 이러한 자체흡수 효과를 보정하기 위해서 측정시료의 기하학적 조건 및 밀도에 따른 효율을 보정하여야 하지만 연구에서는 보정이 이루어지지 않아 효율의 차이가 있는 것으로 보인다. 본 연구를 통하여 환경방사능 안정성 검토를 하며, 국제방사선 방호위원회(이하 ICRP)의 권고사항을 살펴보았다. 국제방사선 방호위원회(ICRP)에서 권고하는 ICRP 26에 따른 방사선 방어의 목표는 "방사선 피폭에 의한 결정적 영향의 발생을 방지하고 확률적 영향의 발생확률을 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지한다"이다(ICRP 1977). 방사선 피폭을 줄이

기 위해서는 외부피폭의 "3대원칙"을 적절히 병행하여 합리적으로 피폭선량을 가능한 낮게 유지해야 하는데, '필요이상으로 선원에 오래 머무르지 말 것'의 의미의 '시간', '가능한 한 선원으로부터 먼 거리를 유지할 것'의 의미의 '거리', '선원과의 사이에 차폐물을 둘 것'의 의미의 '차폐'가 있다.

ICRP 60에서 말하는 방사선 방호체계는 행위의 정당화(justification of practice), 방호의 최적화(Optimization), 선량한도(Dose/risk limits)의 3가지로 구성된다. 행위의 정당화란 ICRP 60에서는 '방사선 피폭에 관련된 행위는 그것이 피폭하는 개인이나 사회에 끼치는 위해를 보상하는 데 충분한 이익을 제공할 수 없으면 채택되어서는 안된다'라고 서술하고 있다. 방호의 최적화의 개념은 어떤 행위에서 특별한 피폭원과 관련하여 기인선량의 크기 피폭하는 사람의 수, 피폭이 확실하지 않는 상태에서는 피폭의 발생 가능성을 경제적, 사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지해야 한다. 이러한 절차는 개인의 선량에 대한 제한, 잠재적 피폭의 경우 개인에 대한 위험의 제한을 이용하여 순수한 경제적, 사회적 판단으로부터 발생하기 쉬운 불평등을 제한해야 한다는 개념이다. 개인선량한도는 모든 관련 행위들의 결합에 의한 개인피폭은 선량한도의 적용을 받아야 하고 잠재피폭의 경우에는 위험에 대한 어떤 제어가 따라야 한다. 이러한 것들은 어떠한 정상 환경에서도 행위로부터 수용 불가한 것으로 판단되는 방사선 위험에 어느 개인도 노출되지 않음을 보증하는 것을 목표로 하고 있다. 모든 피폭원이 그것들에 대해 취해지는 죄에 의해 쉽게 제어되지는 않으며 선량한도는 선정하기 전에 포함될 피폭원들을 적절하게 규정하는 것이 필요하다. 이를 바탕으로 ICRP에서는 연간선량한도를 1 mSv로 제한하고 있다(ICRP 1991).

결 론

본 논문에서 측정한 전남 · 북 산림의 위치에 따른 토양, 물, 나뭇잎에 흡수되어 있는 환경방사능 농도 분포 조사결과 채취한 시료 중에 포함된 자연방사선 계열인 ^{40}K과 인공방사성 핵종인 ^{137}Cs의 방사능 농도를 고분해능 게르마늄(HPGe) 검출기를 이용하여 측정하였는 바 각각의 전남 · 북 지역의 평균 방사능 농도 ^{40}K는 토양이 790 ± 1 Bq·kg^{-1}, 829 ± 1 Bq·kg^{-1}, 나뭇잎이 0.31 ± 0.20 Bq·g^{-1}, 0.44 ± 0.09 Bq·g^{-1}로 검출되어 나타났다. 또한, 토양과 나뭇잎 시료 모두 위도가 높은 전북에서 더 높은 농도 결과가 나타났으며, 토양의 경우 심토에서의 농도가 표토보다 더 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 물 시료분석결과를 살펴보면 채취 당시 미흡한 정보에 의해 필요한 시료의 양을 충분히 채취하지 못하여 검출된 자연방사선 계열인 ^{40}K과 인공방사성 핵종인 ^{137}Cs의 방사능 농도를 고분해능 게르마늄(HPGe) 검출기를 이용하여 측정하였으나, 시료의 양이 적어 농도치가 너무 낮게 나타나거나 이를 제외한 다른 방사능의 농도치도 대부분 불검출로 나타나 비교할 수 없었다. 이로서 환경방사능 측정을 위한 토양, 나뭇잎 및 물 시료를 이용한 방사능 농도를 측정하는 방법은 채취지점의 시료에 포함된 자연 및 인공 방사능 농도를 측정하여 감시 자료와 비교해 봄으로써 상시 환경 방사선 및 방사능의 분포에 대한 전국적인 기초자료를 확보하고 향후 생활환경의 방사능 분석 기술향상에 기여하여 국민 건강 및 환경을 위한 기초 자료로 활용할 수 있으리라 사료된다. KINS에서 제공한 전국의 평균 ^{40}K과 ^{137}Cs의 방사능 농도와 비교한 결과 ^{40}K은 지각의 구성요소에 의한 분포로 측정지점의 차이에도 불구하고 평균 측정값이 비슷한 양상을 보이며 나타났으나, 점토와 유기성이 좋고 표토에 주로 산재되어 있는 ^{137}Cs은 측정지점 선정과, 시료 토양의 성분 차이로 인해 차이가 많이 나는 다른 평균값을 나타내어 지속적인 감시가 필요하다. 본 연구내용을 바탕으로 환경방사능 측정을 위한 토양 시료를 이용한 방사능 농도를 측정하는 방법은 채취지점의 토양 중에 포함된 자연 및 인공 방사능 농도를 측정하여 감시 자료와 비교해 봄으로써 지역주민 및 방문객의 생환환경의 환경 방사능 기초자료로 활용할 수 있으리라 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

The research has been conducted by the Research Grant of Gwangju Health University in 2013 (3013004).

참 고 문 헌

Battist P, Castellani CM, Doerfel H and Tarroni G. 2000. Problems in defining the minimum detectable activity in lungs measurement of low energy photon emitters. *Radiat. Prot. Dosim.* **89**:251-254.

Euclid S. 1997. Radiation Protection and Lippincott, pp. 55-70.

Ghiassi-nejad M, Mortazavi SMJ, Cameron JR, Niroomand-rad A and Karam PA. 2002. Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies. *Health Phys.* **82**:87-93.

ICRP. 1977. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Oxford.

ICRP. 1991. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Oxford.

Ju YJ, Ryu YH, Dong KR, Cho JH, Lee HK and Chung WK. 2012. Study on measurement and quantitative analysis of Radon-222 emitted from construction materials. *Ann. Nucl. Energy* **49**:88-85.

Kim MH, Cho JH, Dong KR, Chung WK, Lee JW and Shin SG. 2012. Measurement and quantitative analysis of radioactivity concentration in soil on playgrounds of Korean elementary schools. *Ann. Nucl. Energy* **47**:21-27.

Kim MH, Kim CY, Hwang HH, Dong KR, Chung WK, Cho JH, Lee HK, Kweon DC, Goo EH and Lee JS. 2012. Measurement and analysis of the concentration of radioactivity in soil on playgrounds of Korean elementary schools. *J. Korean Phy. Soc.* **60**(5):881-889.

Lee MH, Lee CW, Hong KH, Choi YH, Kim SB, Park DW and Lee JH. 1995. A study on distribution of Cs-137 and Sr-90 in soils around Taejon region. *J. Radiat. Prot.* **20**:123-128.

Muramatsu H, Tashiro Y, Hasegawa N, Misawa C and Minami M. 2002. Seasonal variations of 222Rn concentrations in the air of a tunnel located in Nagano city. *J. Environ. Radioact.* **60**(3):263-274.

Panatto D, Ferrari P, Lai P and Gallelli G. 2006. Relevance of air conditioning for 222Radon concentration in shops of the Savona Province, Italy. *Sci. Total Environ.* **355**(1-3):25-30.

UNSCEAR. 2000. Report to the general assembly, with scientific annexes, Vol.I, Annex B; Exposures from natural radiation sources, New York.

Received: 20 June 2018
Revised: 3 July 2018
Revision accepted: 16 July 2018